群集シミュレーションによる歩行空間設計と制御に関する研究動向

Recent Advances in Crowd Movement Space Design and Control using Crowd Simulation

西田 遼 *1
Ryo Nishida

東北大学, 産業技術総合研究所
Tohoku University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
ryo.nishida.t4@dc.tohoku.ac.jp

重中 秀介 *1
Shusuke Shigenaka

筑波大学, 産業技術総合研究所
University of Tsukuba, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
shusuke-shigenaka@aist.go.jp

加藤 優作
Yusaku Kato

(同 上)
yusaku-kato@aist.go.jp

大西 正輝
Masaki Onishi

(同 上)
onishi-masaki@aist.go.jp

keywords: crowd movement control, crowd management, multi-agent simulation, survey

Summary

Crowd congestion causes accidents and sometimes leads to hundreds of injuries and deaths. To mitigate crowd congestion, we could design a space where the pedestrians can move smoothly, or intervene and control the crowd movement. Recently, computer simulation is often used to determine optimal spatial design and crowd control. The simulation methods of crowd movement are well organized because it has been an active area of research since the 1990s to understand crowd dynamics. On the other hand, methods and knowledge of spatial design and crowd control are not well organized, because research topics have recently become more active, and the knowledge is distributed among artificial intelligence, information processing, traffic engineering, civil engineering, architecture, physics, and more.

The purpose of this paper is to summarize the research trends in spatial design and crowd control from the viewpoint of crowd simulation and optimization, which are often discussed in the field of artificial intelligence. We first introduce the evaluation indices of crowd movement in terms of efficiency and safety. Then, we explain the current findings on spatial design and categorize the methods of crowd control, ordered by the level of pedestrian behavior. In the end, the challenges and approaches are discussed based on the previous research.

1. 緒 論

群集移動における問題の一つに群集混雑が挙げられる。群集混雑は、時として数百人の死傷者を出すような事故に繋がる恐れがあるため、対策が必要である。特に、災害からの避難や大規模イベントでは多くの人と同じ場所で同時に移動するため、混雑が発生しやすくなる。混雑下では人々が圧迫され事故に繋がる可能性がある。これまで、明石市の花火大会やサウジアラビアのメッカ巡礼など世界各地で群集事故が報告されている [Soomaroo 12, Still 14]。そのため、群集を安全かつ効率的に移動させる必要があると考えられる [東京大学社会連携部門 20]。

群集混雑を緩和するための対策として「空間設計」と「群集制御」が挙げられる。空間設計とは群集が移動しや

すいような出口の配置や経路の幅などを決めることである。一方、群集制御とは情報提示や誘導などによって群集の移動に直接的に介入し操作することである。

空間設計と群集制御を評価するためにはシミュレーションが強力なツールとなり得る。様々な出口の配置や誘導方法に対する群集の移動を検証するためには、人々が集まるイベントで計測を行うことや、実験として人々を集める必要があるが、コストがかかる。そのため、コンピュータ上で試行を繰り返すことができるシミュレーションが適している。群集の移動を表す方法としては、流体力学を応用して、群集の動きを流体や気体としてモデル化するマクロなアプローチと、個々の歩行者の動きに着目し、歩行者間や歩行者と環境との相互作用をモデル化するミクロなアプローチがある。

*1 These authors contributed equally

図1 空間設計および群集制御の具体的な方法

んに行われている分野であり、すでに体系化が行われている。興味がある読者はサーベイ論文 [Sidiropoulos 20, Yang 20a, Zhou 18] を参照されたい。また、シミュレーションと同様に、群集移動の計測についても研究が盛んに行われている。計測手法としては、手動、Wi-Fi, RFID, Bluetooth, カメラ, LiDAR, GPS などが挙げられる。計測手法のレビューに関しては文献 [Draghici 18, 山下 11] を参照されたい。さらに、計測データから群集の状態を解釈するための分析手法も研究が行われている。例えば、分析手法を用いることで、歩行者一人ひとりの位置や群集の密度などの情報、移動パターンなどが抽出できる。分析手法については文献 [Li 15, Zhan 08] が参考になる。

一方、群集シミュレーションを用いた空間設計や群集制御の方法や知見については整理されているとはいえない。例えば、2016 年時点での群集移動の計測、分析、モデルによる予測、制御の決定の各要素の研究についてのサーベイ論文 [Wijermans 16] や、群集避難の問題に対して最適化を使用している研究のサーベイ論文 [Vermuyten 16] では、最適化の対象が歩行者モデルであることが多く、空間設計や制御を対象とした研究が少ないことが言及されている。2018 年以降、いくつか空間設計や群集制御に関する研究のサーベイ論文が報告されている。2018 年には、標識や誘導員、スマートフォンやロボットなどを用いた誘導方法について [Zhou 18], 2020 年には、避難経路の最適化や避難所への割当最適化について [Kaveh 20], また、誘導方法や避難経路の最適化に加えて、建物の設計や障害物の設置方法について [Haghani 20], 報告されている。しかし、これらはいずれも避難時の群集移動を対象としている。また、日本語文献としては西成らが計測や分析、シミュレーション、群集制御などから構成される群集マネジメントを網羅的にまとめている [東京大学社会連携部門 20]。群集制御に関しては、情報提示による非物理的な制御とバリケードや障害物を用いた物理的な制御に分類して説明しており、その他の方法として行動経済学のナッジ理論に基づく制御方法についても述べているが、空間設計については詳しく述べられて

いない。

本論文では、空間設計および群集制御の研究を体系化し、現在明らかになっている知見について整理することを目的とする。空間設計や群集制御の知見は人工知能、情報処理、交通工学、土木、建築、物理などに分散している。この研究動向では人工知能の分野で取り上げられることの多い、群集のシミュレーションやその最適化という観点で空間設計と群集制御の研究動向をまとめて実践 AI システム論文として報告することで多様な知識やノウハウを体系化する。また、避難だけでなくイベント時や日常での群集移動を対象とした研究についても取り上げる。想定読者は、群集移動に関心のある周辺分野の研究者はもちろん、安全かつ効率的な群集移動の実現を必要とするイベントの主催者や施設の管理者にも参考となるようにしている。

本論文では、ScienceDirect で、“crowd control”, “pedestrian control”, “crowd guidance”, “pedestrian guidance”, “crowd management”, “pedestrian management” をキーワードとして検索した論文と、著者らの判断で追加した論文を調査対象としている。関係研究は Safety Science, Transportation Research Part C, Physica A, Applied Mathematical Modelling, Simulation Modeling Practice and Theory, Fire Safety Journal など出版されており、情報系、土木系、物理系などの広い分野を網羅して調査している。

本論文では、空間設計と群集制御の具体的な方法を図 1 のように整理する。空間設計とは、群集が移動しやすいような出口の配置などのレイアウトを決めて、経路の幅などの移動できる空間の容量を決めることである。一方、群集制御とは、移動し始める時刻や移動する経路などのルールに群集が従うように、物理的な制御や情報提示、誘導、ナッジを通じて群集の移動に介入することである。物理的制御とはガードレールやゲートにより移動を制御する方法であり、情報提示は標識やアプリで移動経路や混雑などの情報を知らせる方法である。誘導は誘導員が定位置で動かずに誘導する方法や、群集と一緒に

表 1 群集移動の評価指標

評価指標			論文
効率性	移動時間	移動完了時間	[Cristiani 17, Dong 14, Ha 12, Khamis 20, Kurdi 18] [Lu 21, Taneja 18, Wang 19]
		合計, 平均移動時間	[Abdelghany 14, Chen 19, Choi 19, Dubey 20, Feng 14] [Haghani 19, Hu 18, Zhang 17]
		各時刻ごとの移動完了・未完了人数	[Ding 11, Dong 14, Ji-hua 13, Karbovskii 19, Li 19a, Li 19b] [Wang 19, Wong 17a, Yang 20c, Zhang 21, Zou 20]
	速度と流量	速度	[Chen 19, Jiang 19a, Karbovskii 19, Salinas 17, Zeng 19]
		流量 (流動係数)	[Chen 19, Zeng 19]
安全性	混雑度	密度	[Chen 19, Hu 18, Liao 14, Wang 19, Zeng 19]
		重複度	[Li 19a]
	その他	進行方向の変化	[Qiao 17]
		被災リスク	[Choi 19, Lu 21]
		感染者数	[Hernandez-Mejia 20]

移動しながら誘導する方法がある。特に後者の誘導員を本論文ではナビゲータと呼ぶ。また近年、行動経済学において人の無意識下に働きかけて行動変容を促す方法であるナッジが注目を集めている。群集移動の分野においても音楽や光、障害物を使って歩行者の速度を無意識的に制御できることが明らかになってきている。なお、群集移動の特性は、一方向流や対向流、出口への流入などに区別され [Duives 13]、研究によって対象とする移動特性が異なるが、本論文では移動特性による研究の分類は行わずに説明に留める。

本論文の構成は以下の通りである。空間設計や群集制御の目的は群集を効率かつ安全に移動させることであり、その目的を共通認識とするために、まず2章で群集移動の評価指標について説明する。本論文では、評価指標を効率性と安全性の観点から整理する。次に3章で空間設計について、4章で群集制御について整理する。そして5章で今後の研究の方向性について述べ、6章でまとめとする。

2. 群集移動の評価指標

群集移動の評価指標は、一般的に効率性と安全性が用いられている。効率的でない移動に対するストレスを数値化する研究 [Osaragi 04] もあるが、歩行者自身が感じる心理的なストレスを計測することは難しい。ストレスや歩きやすさなどの快適性を評価する場合には、アンケート調査を実施する必要がある。本論文では計測可能な効率性と安全性の指標に絞って説明する。

表1に群集移動の評価指標およびそれらを用いている論文を示す。なお、効率性や安全性に関する指標が空間設計や群集制御を決定する際の制約条件に用いられている場合も含めた。表1から効率性の中でも移動時間を評価指標としている研究が多いことがわかる。これらの研究の多くが避難を対象としている。一方で、イベント時

や日常的な移動を対象とした研究では効率性だけでなく安全性を評価している研究もある [Hu 18, Wang 19]。本章では各評価指標の定義について明らかにする。

2.1 効 率 性

移動時間 群集移動の効率性を評価する際には、移動時間を用いることが多い。歩行者ごとに移動時間が計測できる場合は総移動時間や平均移動時間が用いられる。一方、定点観測しかできない場合は全員が移動を完了するまでにかかった時間である移動完了時間を用いる。また、各時刻ごとの移動完了人数を可視化して評価することもある。例えば、複数の群集制御の方法を比較する時に、図2のように、時刻ごとの移動完了または未完了人数を可視化することで最終的な移動完了時間だけでなく時間的な推移が比較できる。

流量と速度 効率性の評価には流量と速度もよく用いられる。なお、流量は流動係数とも呼ばれる。流量と速度に密度を加えた3つの値は交通工学において交通流の特性を表す指標としてよく用いられる。この3つの指標は「流量 = 速度 × 密度」の関係にある。また図3のように3つの指標のうちの2つ（例えば密度と流量）を軸として図示することが多い。このような図を「基本図」と呼ぶ。基本図から、最大流量の目安を見ることができ、望ましい流量の指標に用いることができる。

2.2 安 全 性

混雑度 安全性の指標として、群集が密集することによる危険性を考慮するために群集の混雑度が用いられている。一般的に混雑度として群集の密度が用いられる。ある範囲の面積に対する歩行者数を密度とすることが多い [Hu 18, Lopez-Carmona 21]。または、local density method と呼ばれる、ある位置に対する群集の空間的な分布を算出する方法もある [Chen 19, Helbing 07]。空間設計や群集制御の比較には、図4のように、ある範囲またはある位

図2 時刻ごとの移動未完了人数. 文献 [Zou 20] より引用

図3 密度-流量基本図. 文献 [Feliciani 18] より引用

置での密度を時刻ごとに図示する方法か、図5のように、ある時刻での全範囲の密度、または平均や最大の密度を可視化する方法がある。

密度は小さければ良いが、ある程度までは許容できる。そのため閾値を用いて群集の安全性を評価する。例えば、Lopez-Carmona らは、基本図を用いて流量が減少する密度を閾値として定め、その閾値を超えると安全性が低く

図4 時刻ごとの密度. 文献 [Wang 19] より引用

図5 密度の可視化. 文献 [Wang 19] より引用

表2 Level of Service (LOS)

レベル	群集密度 [peds/m ²]		
	歩道	階段	待機列
A	<0.31	<0.54	<0.83
B	0.31 - 0.43	0.54 - 0.72	0.83 - 1.08
C	0.43 - 0.72	0.72 - 1.08	1.08 - 1.54
D	0.72 - 1.08	1.08 - 1.54	1.54 - 3.59
E	1.08 - 2.17	1.54 - 2.69	3.59 - 5.38
F	>2.17	>2.69	>5.38

なるとしている [Lopez-Carmona 21]. また、歩行者の密度をもとに安全性を評価する基準として、Fruin が定義した Level of Service (LOS) がある [Fruin 71]. LOS は表2のように6段階に分けられており、レベルAからCまでが安定した流れ、Dが不安定に近い流れ、Eが不安定な流れ、Fが危険な流れと定義されている。群集事故が発生しやすくなるのはレベルEからであり、レベルFは死傷事故が発生する可能性が非常に高い。

密度以外の混雑度の指標としては、歩行者の体の重なり度合いを用いている研究もある [Li 19a].

その他 混雑度以外にも群集の安全性を評価する指標がある。例えば、Qiao らは、地下鉄の通路にガードレールを設置した場合の進行方向の変化度合いをもとに安全性を評価している [Qiao 17]. また、Lu らは火災に遭うリスクを評価指標として用いている [Lu 21]. さらに、近年の COVID-19 により感染者数を評価している研究もある [Hernandez-Mejia 20].

3. 空間設計

空間設計とは、群集が移動しやすいような建物の設計を行うことである。シミュレーション技術が発展する以前は、建築基準法で定められている「仕様規定」に則って設計が行われていた。この規定には出入口の数や経路の幅などが具体的な数字で示されており、規定に従えば容易に設計できるという利点があった。しかし、仕様規定では、その具体的な指定のために、設計の自由度が制限されていた。そこで、避難時の安全性や効率性といった性能を満たす範囲内であれば、自由な設計を可能にす

表3 空間設計の分類

設計対象		論文
レイアウト	出口の位置	[Ezaki 12, Khamis 20, Kurdi 18]
	改札口の位置	[Jiang 19b, Liao 14]
容量	経路の幅	[Feng 14, Li 19b, Taneja 18]
	改札口やエスカレータの進行方向	[Hu 18, Ji-hua 13]
	出口の幅	[Ha 12]

るという考えに基づき、性能で設計の良し悪しを評価する「性能規定」が取り入れられた [萩原 95, 高木 02]. 性能の計算方法は、建築基準法に記されており、居室の面積や経路の距離から、居室の出口に達するまでに要する歩行時間や出口通過時間などが算出できる. 現在は、シミュレーション技術が発展し、より高精度に性能を評価できるようになったため、シミュレーションの利用も増えている [Deere 21].

本論文では、空間設計として、出口の数や配置などのレイアウトや、経路や出口などの移動できる空間の容量について研究している論文を報告する. 空間設計の対象は、主に建物内の部屋や建物全体である. 表3に空間設計の分類および関連論文を示す. レイアウトと容量の研究について順に説明する.

3.1 レイアウト

出口や改札口、チケット売り場では流量が小さくなり混雑が発生しやすくなる. そのため、それらの最適な数や配置を決める研究が行われている.

出口の数を増やすことで群集移動は効率的になるが、出口の数が同じ場合、出口の位置が移動時間に影響を与える. 一つの部屋に一つの出口を設置する場合は、部屋の角に出口を設置するのが望ましいことが報告されている. 部屋の中央に出口を設置する場合は3方向から力を受けるのに対し、部屋の角に出口を設置した場合は力を受けるのは2方向からになるため、歩行者間の反発力が小さくなり、効率的に移動できる. また、一つの部屋に複数の出口を設置する場合は、出口ができるだけバラけるように設置するのが望ましいとされている [Kurdi 18]. 一方、複数の部屋における出口の位置は、通路を挟んで向かい合う部屋で同じ位置にするのが良いとされている [Khamis 20]. また、図6(下)のように、部屋の角に出口を設置すると、最終的な出口で混雑が発生しやすくなるため、部屋の角に出口を配置することは逆効果となることに注意すべきである. このような場合は、図6(上)のように部屋の真ん中に出口を設置し、流量を大きくしすぎないようにすると最終的な出口では混雑が発生しない [Ezaki 12].

改札口(またはチケット売り場)の位置は出口の場合と異なり、ある程度同じ位置に配置するのが一般的である. 改札口では通過時にチケットを切る時間が必要なた

図6 出口の位置と群集移動の違い. (上) 部屋の真ん中に出口を設置, (下) 部屋の角に出口を設置. 青が歩行者, 赤が最終的な出口を示す. 文献 [Ezaki 12] より引用

図7 改札口の位置の違い. 文献 [Jiang 19b] より引用

め、ボトルネックとなりやすい. 文献 [Jiang 19b, Liao 14] によると、混雑を緩和する方法として、改札口を凹状に設置することが有効である. 図7のように、下から上に向かって歩く群集に対して、改札口を「平行、凸状、凹状」に設置する場合を考える. 改札口を平行や凸状に設置した場合、多くの歩行者は外側から利用する傾向にある. 一方、改札口を凹状に設置した場合、歩行者はまず最初に移動距離の短い内側の改札口を利用することを考える. そのため、内側の改札口の利用も増え、群集が全ての改札口に分散し混雑が緩和されることが報告されている.

3.2 容量

出口の数や位置などのレイアウトが決まれば、出口に行くまでの経路の容量や出口の容量について設計する必要がある. 経路の接続方法に関しては、経路の容量を0

にするか否かで判定するとして、経路容量を決める問題に含める。

経路の容量を大きくすることで混雑が緩和され移動時間は短縮される。しかし容量を大きくすると、設置費用もかかるため適切な経路容量の設計が必要である。そのため設置予算以内での経路容量設計 [Feng 14, Taneja 18] や、2.2 節で述べた混雑度に対する安全性の指標である LOS を用いた設計 [Li 19b] が考えられている。

また、緊急時には改札口やエスカレータの進行方向の制約をなくすことで経路容量を増やし、避難時間の短縮に貢献できることもわかっている [Hu 18, Ji-hua 13]。そのため、緊急時に迅速に進行方向を操作できるような設計を事前にしておく必要がある。

出口の幅が小さいと出口がボトルネックとなり混雑が発生するため、適切に出口の幅を設計する必要がある。当たり前ではあるが、出口の幅を一定以上の大きさにすることで、出口付近の混雑が緩和し移動時間を短縮できる。ただし、特にメインとなる出口の幅が移動時間に大きく影響することを念頭に入れた設計が必要である [Ha 12]。

以上、レイアウトと容量の設計について述べた。空間設計は建物や道路などの移動空間を建設する前に、様々な設計案を事前にシミュレーションし、群集が安全に効率的に移動できる設計案を検討する。シミュレーション上では歩行者を模したエージェントが行動し群集移動を形成する。エージェントの行動モデルには、最短経路を移動するモデル [Hu 18, Ji-hua 13, Kurdi 18] や混雑度を考慮して経路選択を行うモデル [Liao 14]、パニックになると移動速度が上がるモデル [Ha 12] などが用いられている。また、設計案が多数ありすべてを検討できない場合には最適化手法を用いて探索を行う。タブサーチや遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティクスのアルゴリズムが用いられることが多い [Feng 14, Khamis 20, Li 19b]。

4. 群 集 制 御

群集制御とは、移動し始める時刻や移動する経路などのルールに群集が従うように、物理的な制御や情報提示、誘導、ナッジを通じて群集の移動に介入することである。なお、群集の計測や分析、モデリング&シミュレーションの手法は、Hoogendoorn らが定義した歩行者の行動レベルを用いて分類されている [Haghani 18, 山下 11]。Hoogendoorn らは、歩行者の行動を表 4 に示すような 3 つのレベルに分類している [Hoogendoorn 04]。歩行者が移動するときには、3 つのレベルの上から順番に意思決定をしていく。本論文でも表 5 のように、歩行者の行動レベルの観点から群集制御の方法を分類する。なお、本来の定義では、Strategic level に活動選択も含まれるが、本論文で対象とする群集の移動は避難やイベントからの帰宅など、目的とする活動が一意に決まっているとして、

表 4 歩行者の行動レベルの分類

行動レベル	概説
Strategic Level	行動を開始する前の意思決定で、移動開始時刻や活動内容を選択
Tactical Level	Strategic level での選択のあと、経路や経由する出口（扉）を選択
Operational Level	Tactical level で選択した経路上で、他人や障害物を回避しながら歩行

Strategic level において活動選択は扱わない。

現実世界において群集制御が必要な対象は、避難時の移動や数万人が集まるスポーツや音楽などの大規模イベント時の移動、駅構内での移動など様々である。また、制御を行う場所も、一経路や一部屋内、高層ビルやスタジアムの建物全体など複数存在する。このような群集制御の規模についても、歩行者の行動レベルをもとに区別する。例えば、経路上での移動を制御したい場合、歩行者はすでに Tactical level での意思決定をしたあとなので、Operational level の歩行のみが制御対象となる。一方、スタジアムからの退場を制御したい場合、Strategic level の移動開始時刻、Tactical level の経路、Operational level の歩行すべてを制御対象とすることができる。このように制御を行う行動レベルの組合せによって群集制御が対象とする群集移動の規模が区別できる。本論文では、厳密に群集移動の分類は行わないが、制御対象によって制御方法を選ぶ際の参考にされたい。

4.1 Strategic level の群集制御

群集の移動開始時刻を制御する。移動開始時刻は移動前時間 (pre-movement time) とも呼ばれる。移動開始時刻の制御に関する研究や実証はまだ少ない。そのため、ここではルールについての研究の一般的な知見ではなく、ケーススタディの結果のみを紹介する。なお、物理的な制御としては、入退場ゲートでの人数制限や、スタジアムの場合はブロックごとの移動開始時刻の分散が考えられる。また情報提示としては音声アナウンス、誘導としては現場スタッフが誘導する方法が考えられる。

§1 ルール

移動開始時刻を分散させることで混雑を緩和し、移動の効率性や安全性の向上が見込める。ここでルールとは誰がいつ移動を開始するかを決めるものである。

出口や経路が複数ある場合には移動開始時刻の分散が移動時間の短縮に貢献することが、避難とスタジアムからの帰宅を対象としたシミュレーション分析で確認されている。避難を対象とした研究では、避難出口と避難開始時刻の両方を最適化した結果、出口に近い人はすぐに、遠い人は少し待機してから避難を開始するのが良いことが指摘されている [Abdelghany 14]。また、スタジアムからの帰宅を対象とした研究では、勝利チーム側の退場を遅らせることで移動完了時間が短くなることがシミュ

表 5 群集制御の分類

制御対象	論文		
Strategic Level	ルール	移動開始時刻	[Abdelghany 14, Haghani 19, 高島 20]
Tactical Level	ルール	移動経路	[Choi 19, Fang 13, Goerigk 14, Lopez-Carmona 21, Lu 21] [Lujak 17, Lujak 18, Wong 17a]
		情報提示	標識 [Dubey 20, Zhang 17] アプリ [Yamada 20]
	誘導	誘導員	[Shimizu 20]
		ナビゲータ	[Srinivasan 17, Yang 20b, Zhang 21, Zhou 18]
Operational Level	ルール	歩行速度	[Hu 18, Zou 20]
		歩行者間距離	[Hernandez-Mejia 20]
	物理的制御	ガードレール	[Qiao 17, Wang 19]
	ナッジ	音楽	[Zeng 19]
		障害物	[Chen 19, Cristiani 17, Cristiani 19, Jiang 19a, Li 19a, Shi 19]

図 8 移動開始時刻の分散度と密度の関係性。左から移動開始時刻の分散が大きい, 中程度, 小さい場合の密度。文献 [Haghani 19] より引用 (一部改変)

レーションで示されている [高島 20]。

一方で, 状況によっては移動開始時刻を分散させるよりも, 全員同時に移動を開始するのが良いという研究結果も報告されている [Haghani 19]。図 8 は, 上左右の部屋から下の部屋の出口まで移動するというシナリオで移動開始時刻の分散度を変えてシミュレーションした結果を示している。全員同時に移動を開始すると真ん中の部屋で混雑が生まれるが, 平均移動時間は最も小さくなる。これは, 混雑による物理的圧力が事故を発生するレベルにならない限り, 全体の避難を遅らせることはなく, 移動開始時刻の分散による移動開始の遅れのほうが大きくなるためだと考えられる。

また, 高層建築物における火災からの避難を想定して, 避難を開始する時刻を階ごとに分ける避難方法も考えられている。この避難方法は順次避難と呼ばれ, 具体的には火災発生階およびその直上階を優先的に避難させ, 他の階はその後から避難させる。順次避難は避難時間を短縮するとは限らないものの, 階段での合流による混雑を回避できることが, シミュレーションを用いた分析でわかっている [Gravit 18, Koo 13]。

4.2 Tactical level の群集制御

Tactical level の群集制御は, 群集の移動経路や使用する出口の選択を制御する。実世界ではバリケードやガイドポールを用いる物理的な制御や, 壁の色や部屋の明る

さを変えて誘導するナッジなどが考えられる。また, 多くの研究ではシミュレーションを用いて効果検証が行われている。歩行者が適切な移動経路や出口を選択することで, 歩行者の流れが分散し混雑が緩和され, 群集事故の防止や移動効率の向上に効果的であることが分かっている。本章では, Tactical level の群集制御の具体的な方法と知見を紹介する。

§1 ルール

歩行者一人ひとりが最短経路で移動すると混雑が発生するため, 管理者が歩行者の移動にルールを設ける必要がある。歩行者同士が協調するというルールを設けることで, 局所的な混雑が緩和され群集全体の移動時間を短縮できる [Lujak 17, Wong 17b]。例えば, 避難時に歩行者同士が協調して最短経路だけではなく複数の経路を利用することで, 混雑が分散し安全かつ効率良く避難できることが確認されている [Ding 11]。また, 建物からの火災発生時に, A*アルゴリズムで避難経路の割り当ての最適化を行い, 安全性の高い迂回経路を選択させることで安全に避難できることを示している [Choi 19]。

実世界では提示されたルールに従わない歩行者も存在するため, 歩行者の意思決定を考慮する必要がある。ルールを守らない歩行者モデルをシミュレーションに追加することで, 現実に近い群集を想定して群集制御の有効性を確認できる [Lopez-Carmona 21, Lujak 18]。例えば, 避難時に想定される歩行者の不安やフラストレーションを考慮した歩行者モデルを混ぜて実験を行い, 非合理的な経路を選択する歩行者がいる環境下での群集制御の有効性を検証している研究がある [Lu 21]。

また, 群集移動では効率性と安全性はトレードオフの関係にあり, 相反する目的を同時に最適化するために多目的最適化が用いられている。多目的最適化手法の NSGA-II [Deb 02] を用いて, スタジアムからの避難における避難時間と群集密度 [Fang 13], または都市部の避難における避難時間と被災リスク [Goerigk 14] を目的関数とした避難経路の最適化が行われている。

§ 2 情報提示

歩行者への情報提示を行うため、適切な場所に標識を設置する必要がある。標識の数や位置を変えることで、情報伝達が効率化され、歩行者がスムーズに移動できる [Zhang 17]. 例えば、標識が見える範囲を最大化するような標識の位置と角度を粒子群最適化を用いて最適化することで、出口の発見速度が向上し、道に迷うことなく効率的に避難できる [Dubey 20].

標識で情報提示すると群集全体が進路を変え混雑が分散しない場合があるため、小集団単位で情報提示できる必要もある [Bernardini 17]. 例えば、テーマパークのアトラクションの待機列にいる一部のみに、アプリで混雑情報を提供することで、空いているアトラクションに目的を変えさせることで、混雑を分散することができる [Yamada 20].

§ 3 誘導

イベント時の一時的な混雑に対しては、静的な物理的制御や情報提示では対応できない場合がある。そのため、誘導員やナビゲータによる状況に応じた制御が必要となる。スタジアムへの入場を対象とした研究では、誘導員が入口の開閉を制御しており、開閉の間隔を強化学習で最適化することで移動時間が短くできることが報告されている [Shimizu 20].

また、歩行者が周りの歩行者に追従する性質を利用した、ナビゲータを用いる制御方法が考えられている。歩行者はその性質により、一人が間違えた方向に移動すると周囲も間違えた方向に移動する傾向がある。そのため、適切な位置にナビゲータを配置することで、周囲の人が迷うことなく効率的に避難できる [Srinivasan 17, Zhang 21, Zhou 18]. また、室内の避難を対象とした研究では、人が密集している場所にナビゲータを配置することで、出口の発見速度が向上し避難時間の短縮が実現できている [Yang 20b].

4.3 Operational level の群集制御

Operational level の群集制御は、目的地や経由地点に向かうまでの歩行行動を制御する。ガードレールや柵などで歩行者を強制的に従わせる物理的な制御や、障害物や音楽などで、選択の自由を残しながら歩行者を誘導するナッジなどが考えられている。群集は他者との接触回避や追い越しなどで、歩行速度を頻繁に変更している環境では事故発生リスクが極めて高い。そのため、歩行速度を統一する群集制御が必要とされている。また最近では、Covid-19 の影響により、感染症の拡大防止に向けて歩行者間距離の調査を行う研究も増えてきている [Hernandez-Mejia 20, Hu 18].

§ 1 ルール

速度や歩行者間距離を調章するルールが考えられている。出口付近での移動を対象とした実験では、歩行速度が速いと出口での混雑が発生し、全体の避難効率が悪く

図9 障害物の有無と密度の関係性. 文献 [Li 19a] より引用

なることがわかっている。このような現象は「faster-is-slower」と呼ばれており、出口付近では歩行速度を落とすことが推奨されている [Garcimartín 14, Hu 18]. 似たような実験で、Zou らは重症患者のような歩くのが遅い人を優先して避難させるルールを提案している。ルールを適用することにより避難完了時間を 1589 秒から 701 秒に短縮することに成功している [Zou 20]. 最近では、Hernandez らが感染病拡散防止に向けた店内の歩き方のルールをシミュレーションを用いて検証している。感染病拡散を 90%以上抑えたい場合、店内の人数上限を 20 人、歩行者間距離を 1m 以上保つ必要があると結論づけている [Hernandez-Mejia 20].

§ 2 物理的制御

歩行速度のばらつきを抑える手段として、ガードレールや柵による物理的な制御方法が考えられている。歩行速度がバラバラな環境では追い越しを行う歩行者が頻繁に発生するため衝突事故のリスクが高くなる。ガードレールの設置は歩行者の並びを整理するだけでなく、追い越しできない長さに道幅を調章することができる。これまでガードレールを用いた実験がいくつか行われており、ガードレールを用いていなかった時より安全であることが示されている [Qiao 17, Wang 19].

§ 3 ナッジ

歩行行動は人の視覚情報に大きく左右されており、障害物を用いた制御方法が考えられている。障害物は人の回避行動を利用して密集を避けることが可能であり、混雑による事故発生リスクを減らす手段として有効である。障害物の効果的な設置方法として、歩行者の進行方向に対して中央に障害物を設置する方法がある。双方向に人が流れる通路では群集同士の衝突事故が問題となっており、中央に障害物を設置することは、群集の流れの分割になるため衝突事故の回避に繋がることが示されている [Chen 19]. 出口手前の中央に障害物を設置する実験でも同様の効果が得られている。出口付近の設置方法は、図 9(a) のように出口の両端に障害物を設置する方法もある。図の色は赤色になるほど群集混雑に巻き込まれていることを表している。(b) に比べ (a) の方が赤色が少ないのは、出口付近の混雑が障害物によって離されたからと考えられる [Li 19a, Shi 19]. 他にも、障害物の位置や形状の調章によって歩行者の避難時間を短縮する実験

[Cristiani 17, Cristiani 19] や動く障害物を用いた歩行者速度の調章 [Jiang 19a] などがある。

音楽が流れている環境では、視覚情報の次に聴覚情報も歩行行動に影響を与える [Zeng 19]。そのため、音楽を用いた制御が考えられている。歩行速度はアクティブな音楽を聴くと速くなり、リラックスする音楽を聴くと遅くなるため、歩行速度は曲の速度を表す BPM(Beats Per Minute) に関係すると言われている [Styns 07, Ikeda 17]。高密度環境で BPM の速い音楽を使用した実験では、通常よりも速く歩く人が多かったため、音楽を流していない時よりも危険になるという結果が得られている [Zeng 19]。

5. 課題とアプローチ

ここまで空間設計と群集制御の研究について整理して説明した。本章では現状の問題点から課題を抽出し、その課題を解決するアプローチについて述べる。問題点、課題、アプローチをまとめたものを図 10 に示す。

5.1 現状の問題点と課題

空間設計と各歩行者の行動レベルに対する群集制御の現状の問題点と課題について述べる。

§ 1 空間設計

空間設計は、現状はシンプルな環境を想定した研究が多いため、ビルやスタジアムなどの実際の施設を想定して、より複雑で広範囲の空間で設計の検証をする必要がある。

また、3 章でも述べたように、出口を部屋の角に配置することは、複数の部屋からの移動を考える際には移動の効率性を下げる場合があった。このように部分最適と全体最適は異なることもあるため、施設全体を模したシミュレータでの検証が必要となる。

さらに、歩行者の移動は、出口の配置や経路の幅以外にも、照明 [Ferreira 16] や店舗の面積 [Guo 13]、景観 [Koh 13]、交差点の数 [Agrawal 08] などからも影響を受けることが知られている。そのため、今後の空間設計にはこれらの要素も取り入れていくべきであり、様々な要素に対する群集行動の理解が必要となる。

上記で述べた問題点を解決するために取り組むべき課題を考える。まず、実際の施設を想定した複雑で広範囲な空間を設計するためには、実際の施設を模したシミュレータが必要となる。しかしシミュレータの開発には技術的または時間的コストがかかるため、3 章で述べた法令で定められた計算式を用いて設計されることが多く、実際はシミュレータを用いて設計する例は少ない。そのため、今後シミュレータ開発の効率化に取り組むべきであると考えられる。

また、施設全体を模したシミュレータでの最適化を行うためには、計算コストがかかる。なぜなら、施設全体

を対象とする場合、簡易的な環境を想定した場合よりも、シミュレーションの一試行に時間がかかり、かつ最適化を行うためには、シミュレーションを何試行も実行する必要があるからである。そのため、シミュレーションの高速化や、最適化計算を行う際の計算コストの削減が必要となる。

そして、群集の行動理解のためには、実際の群集の行動を計測する必要がある。しかし、避難やイベントといった、群集が発生しやすい状況は日常的ではない。そのため、計測装置の設置や管理のコストに見合うメリットを生み出すことが難しく、計測装置を設置することは現実性が低い。また大人数を集めて実験を行うのもコストがかかる。そのため、行動理解のための群集計測のコストを削減する方法を考える必要がある。

§ 2 Strategic level の群集制御

表 5 に示される通り、歩行者の行動レベル間で群集制御の研究の進捗が異なり、特に Strategic level、つまり移動開始時刻の制御に関しては研究が少ない。理由としては、避難では移動開始を遅らせることが現実的ではなく、これまで議論にあがらなかったことや、他のレベルに比べてデータ収集やモデリングの研究が進んでおらず、まだ制御を研究対象とする段階になっていないことが考えられる [Haghani 18]。

Strategic level の制御に関しては、まずはその有効性を明らかにすることが先決である。そのためには効率性だけでなく安全性の評価も必要である。先行研究では、効率性のみを評価指標にした場合は移動開始時刻を分散せずに一斉に移動するのが良いとされている。複数の評価指標を用いて検証することで、移動開始時刻の制御の有効性が見えてくると考える。

また、現状の研究では、想定する状況が少なく、どのような状況なら分散させるのが良いのか、もしくは分散させないのが良いのかが明らかではない。そのため、様々な状況に対する検証も必要である。

さらに、実世界でも効果的な誘導制御を行うためには、歩行者の移動開始時刻の選択に関わる要因を理解することが重要である。避難においては、危険な状況に対する個人の認知や、災害の発生源との距離、出口との距離などが移動開始時刻に影響を与えることがわかっている [Kuligowski 09, Sherman 11]。しかし、スポーツや音楽イベントなどにおいては、移動開始時刻の選択に関わる要因は定かではない。また複数の要因と選択の関係性をモデル化することもシミュレーションを行う上で必要となってくる。

上記で述べた問題点を解決するために取り組むべき課題としては、効率性だけでなく安全性も含めた複数の評価指標で評価するためのシミュレーションの高精度化、そして様々な状況に対応するためのシミュレータの開発と、網羅的にシミュレーションするためのシミュレーションの高速化、そして移動開始時刻の行動を理解するための

図 10 課題とアプローチ

群集計測の効率化が挙げられる。

§ 3 Tactical level の群集制御

Tactical level の制御は、実際の避難やイベントを再現したシミュレーション環境での最適化まで研究が進んでいる。しかし、最適化した制御の効果を実世界で検証している研究はほとんど例がない。理由としては、街や建物全体などを実験対象の規模が大きいため、計測や制御にかかるコストが高く実証実験を行うことが難しいためと考えられる。

研究の成果を実世界で検証する手前まで研究が進んできている一方で、様々な環境や状況で制御の有効性を検証することも必要である。Tactical Level の研究の多くは、独自に所持しているデータやシミュレーションで検証しているため制御方法の比較が難しい。そのため、統一された実験データやシミュレータを用意することで、制御方法の有効性が見えてくると考える。

また、実世界でも効果的な制御を行うためには、時々刻々と変化する混雑状況に合わせた制御が重要である。群集制御が必要とされるスポーツ観戦や音楽イベントでは、混雑状況の急な変化や事故が発生する恐れがある。そのため、動的な状況変化に対応できる制御が求められる。

さらに、実世界の群集制御はトレードオフ関係にある効率性と安全性の両方を考慮した制御が求められている。既存研究の多くは、シミュレーションの計算コストの高さから探索空間を縮小するために、効率性と安全性のどちらかを評価して最適化することが多く、制御の有効性を判断するのが難しい。複数の指標を同時に最適化することで、トレードオフ情報を可視化する必要がある。

上記で述べた問題点を解決するために取り組むべき課

題としては、施策の効果検証の効率化、そして様々な状況に対応するためのシミュレータの開発と、動的な制御を行うための最適化の高速化、そして複数の指標を同時に最適化するためのシミュレーションの高速化が挙げられる。

§ 4 Operational level の群集制御

Operational level の制御は、シミュレーション環境から実世界に導入するところまで研究が進んでいる。しかし、使用されている環境は部分的であることが多く、環境全体に効果的な制御になっているのか検証が行われていない。また、シミュレーションで想定した制御の結果が実世界でも同じ結果になるかも検証されていない。これらを実現するためには、実際の避難やイベントの中で制御実験を行う必要があり、Tactical level と同様に制御や計測にかかるコストが高く現状では困難である。

特に、Operational level の研究に使用されている環境は一方通行や四角の部屋など単純な環境を対象とした制御しか行われていない。実際の環境では多叉路の道路や大小2つの部屋を合わせた部屋なども存在する。より複雑な環境に対して群集制御を行う場合、複雑な環境に対応した制御が必要である。

歩行行動は群集制御によって変化する。また、制御は人の心理にも影響を与える。しかし、カメラやGPSなどの計測機器では、群集制御と歩行行動における心理の変化の関係を定式化できていない。例として音楽やリズムなどが挙げられる。効果的な群集制御を実現するためには、人の心理の変化を定式化することが重要であり、心理に関係しそうな情報を計測することが求められる。

上記で述べた問題点を解決するために取り組むべき課

題としては、実際の避難やイベントにおいて施策がどれほど効果的なのか検証することと未知の行動理解のために様々な要素を計測することが挙げられる。

5.2 アプローチ

現状の研究を踏まえ、今後取り組むべき課題として、シミュレータ開発の効率化、シミュレーションと最適化の高速化および高精度化、施策の効果検証と行動理解のための計測の効率化、を挙げた。本論文ではこれらの課題を解決するアプローチとして、図 10 に示すように、オープンソースシミュレータ、Building Information Modeling、高速シミュレータ・代理モデルによるシミュレーションの近似・Multi-fidelity 最適化などのシミュレーションおよび最適化の高速化技術、データ同化によるリアルタイムデータを用いた予測、多目的最適化、オープンデータ、バーチャルリアリティを取り上げる。各アプローチについて述べる。

§1 オープンソースシミュレータ

シミュレータは現実に近い現象を高精度に表現できる一方で、開発にコストがかかる。近年では商用のシミュレータやオープンソースのシミュレータも開発されており、これらを用いることで自分で一からシミュレータを開発するコストを省くことができる。

商用のシミュレータとしては A&A 社の SimTread [A&A] や PTV 社の Viswalk [PTV], Bentley 社の LEGION [Bentley], グリニッジ大学の火災安全工学グループが開発した buildingEXODUS [Fire Safety Engineering Group], 構造計画研究所の artisoc (教育向けは無償) [構造計画研究所] などがある。またオープンソースの群集シミュレータとしては CrowdWalk^{*2} [山下 11] がある。他には、交通シミュレータの SUMO^{*3} [Lopez 18] や MATSim^{*4}, または汎用的なマルチエージェントシミュレータの NetLogo^{*5} を群集シミュレーションに用いている例もある。オープンソースのシミュレータは GitHub 上に公開されており、新たな機能を追加することも可能である。機能の多様化により利用者の参入を増やし、その利用者がさらに機能を追加していくという好循環を回していくことが期待される。

§2 Building Information Modeling

オープンソースのシミュレータを用いることで、シミュレーションを手軽に実行することができるが、シミュレーションを実行する上で必要となるマップは、各々が対象とするシナリオに応じて自分で作成する必要がある。近年、Building Information Modeling (BIM) という施設の情報を管理するプロセスが普及している。BIM は施設を構成する通路や壁などをオブジェクトとして定義し、形状や素材、組み立てる工程などの属性情報を付与して管理す

図 11 BIM を用いたシミュレーションのイメージ。文獻 [Mayer 14] より引用

る。また施設のモデルが 3 次元データ化されているため、施設のマップデータを簡単にシミュレータに取り込むことができる。これにより、図 11 のように、マップからシミュレータを構築し、シミュレーションを用いて空間設計を最適化し、マップを修正し、またシミュレータに入力する、というサイクルを効率的に回すことができる。商用のシミュレータ LEGION では BIM データからシミュレータを構築する機能が備わっている [Khemlani]。今後、オープンソースのシミュレータでも同様の機能が実現できれば、空間設計や群集制御の研究の加速が期待できる。また BIM データの構築に LiDAR で得られる点群データが用いられる例も増えている [Macher 17]。LiDAR で計測されるような点群データの処理は人工知能の分野でも発展してきており、今後は、施設の空間の LiDAR による計測、点群データの処理、BIM データの作成の自動化が、シミュレータ開発の効率化を進めるためにも重要な研究トピックだと考えられる。

§3 シミュレーションや最適化の高速化技術

本論文で紹介した多くの研究では、歩行者一人ひとりをエージェントとしてみなすマルチエージェントシミュレーションが利用されている。しかし、マルチエージェントシミュレーションはエージェント数が増えるに連れて計算時間が増大するため、数万人が集まる大規模イベントの実験や繰り返し計算を行う最適化問題では計算コストが高く実用的ではない。そのため、シミュレーションを高速化する手法や最適化の計算コストを削減する手法を検討する必要がある。シミュレーションを高速化する研究では、計算を簡略化した 1 次元歩行者モデルの提案や、シミュレーションの出力を代理モデルや機械学習で近似する手法が提案されている [Sóbestor 14, 山下 12, 山下 20]。一方で最適化の計算コストを削減する方法は群集の分野ではほとんど研究されておらず、風車や自動車の設計など構造最適化の分野で研究が進められている。例えば、風車の羽根の形状設計の最適化において、複数の精度のシミュレーションを組み合わせる Multi-fidelity 最適化が利用されている [Réthoré 14]。fidelity とはシミュレーションやモデルの忠実度のことである。fidelity が高いシミュレーションは、3D モデルなど実世界を緻密に再現しているため精度が高い一方で計算コストが高く、

*2 <https://github.com/crest-cassia/CrowdWalk>

*3 <https://github.com/eclipse/sumo>

*4 <https://github.com/matsim-org>

*5 <https://github.com/NetLogo/NetLogo>

fidelity が低いシミュレーションは、数値テーブルなど実世界の再現度が低いため精度が低い一方で計算コストも低い。Multi-fidelity 最適化では、fidelity の低いシミュレーションで大域的な探索を行うことで、fidelity の高いシミュレーションの実行回数を削減し、計算コストの低減に成功している。

今後は、シミュレーションや最適化の高速化を課題としている構造最適化の技術が群集分野においても応用できるのではないかと考えられる。

§4 データ同化による予測

高精度な群集移動を予測するには、実世界全体の観測データと精密な群集シミュレーションが必要である。しかし現実では、部分的な観測データしか得られず、かつ群集シミュレーションは膨大な計算量を必要とするため、リアルタイムの予測は困難になる。そこで、部分的な観測データと数値シミュレーションを融合して大規模現象を予測するデータ同化が群集の予測手段として注目されている。

データ同化は天気や海洋情報など、自然現象の予測に用いられていた手法である。自然現象の観測データは実世界全体を取得することが困難であるため、部分観測データをシミュレーションに与えて予測を行っていた。従来の群集の観測データは自然現象ほど大規模ではなかったが、計測機器と計算性能の向上により、群集にも扱われるようになってきている。松林らは、実世界で観測された人々の通過人数から、人々が「いつ、どこから、どこへ」流れるかをデータ同化によって推定し、実世界に即した群集移動を群集シミュレーション上で再現可能にしている [松林 19]。重中らは、カメラや GPS による観測データに群集シミュレーションによる計測データを同化することで、イベント群集を高精度に再現することに成功している [Shigenaka 19]。

予測手法は期間が長くなるほど不確実性が大きくなるといった問題がある。その要因として、予測対象の持つ性質、観測データの不足、シミュレーションの細かさなどが挙げられる。観測データとシミュレーションの性能は技術の発展と共にある程度改善されるが、予測対象の持つ性質は手法自身を改良する必要がある。近年、気象分野では不確実性を考慮したアンサンブル予報と呼ばれる手法が生み出されており、予報から見積もられる誤差を利用することで、長期間の予測に対応できるようになってきている。群集の分野でもアンサンブルな予測手法が生み出されれば、長期間の予測が期待できるだろう。

§5 多目的最適化

本論文では、群集移動の評価指標として効率性と安全性を挙げた。リスクの大きさに応じてどちらの指標を重んじるかは変化するが、どちらも重要な指標である。二つの指標にはトレードオフの関係が存在するため、空間設計や群集制御を決定するためには、複数の指標を同時に最適化する多目的最適化を用いることでトレードオフ

が可視化することが重要である。

現在の群集を対象とした多目的最適化の研究は、群集の効率性と安全性を目的関数に最適化を行っており、目的関数の数は 2,3 個に限られている。しかし、群集制御を歩行者全員が受け入れられるものとして実世界で適用するためには、イベント管理者に加えて歩行者の観点を考慮する必要がある。歩行者一人ひとりにまで視点を広げ、それぞれが異なる目的関数を持っていると考えれば、究極的には目的関数の数は数百から数万となる。これは既存の多目的最適化と比べて非常にチャレンジングな課題と言える。

既に多目的最適化の分野では、目的関数の数が増えることでパレート解への収束が難しくなることや、高次元のトレードオフ曲面を近似、可視化することが難しくなることが指摘されている。これを解決する最も直接的な方法はシミュレーションの試行を増やすことであり、シミュレーションの高速化は重要な課題となる。この課題を解決するアプローチは上記で述べている通りである。また、他のアプローチとして目的関数の数を減らすことが考えられる。Objective reduction と呼ばれる、相関を持つ目的関数をまとめて扱う方法が提案されており、群集の最適化問題にも応用できると考える。今後は、より多様な目的関数を考慮した問題設定と多目的最適化のアルゴリズムの研究を進めていくべきであろう。

§6 オープンデータ

現実の群集移動のデータは、シミュレーションの高精度化や実世界を想定した施策の効果検証に必要である。しかし群集移動を計測するコストや、群集移動が発生する状況の少なさなどから、データを収集するのは困難である。そのため今後は群集移動のデータをオープン化し、歩行者行動のモデル化やシミュレーションの研究をより活発にしていくことが重要である。現在、群集の軌跡データに関してはオープンになっているものがある。例えば、軌跡予測のサーベイ論文にて、軌跡データセットが整理されている [Rudenko 20]。しかし、現在オープン化されている群集移動データの多くが、移動する経路や出口が変化しない移動を対象にしている。そのため、これらのデータは Operational level のモデリングやシミュレーションには使用できるが、Tactical level や Strategic level のモデリングやシミュレーションには利用できない。Tactical level のデータセットとしては、群集環境下での歩行者の経路選択を計測したデータがオープン化されている [Haghani 17, Liao 17]。一方、Strategic level では、例えば文献 [Lovreglio 15] で、映画館からの避難のデータセットを用いて避難開始時刻の選択をモデル化しているが公開はされていない。今後は、より高度な行動レベルのデータを公開していくことで、研究がより推進するものと考えられる。しかし、その一方でプライバシーの問題にも考慮する必要があるであろう。

図 12 出口選択のデータを収集. 文献 [Lovreglio 16] より引用

§ 7 バーチャルリアリティ

空間設計や群集制御の評価はシミュレーションを用いて行われてきたが、実際の群集に対して効果的であるかを検証するには、やはり実際の群集や歩行者に対して検証する必要がある。しかし人を集めるコストの観点から、実際の群集に対する検証は難しい。またモデルを充実させるためにも群集移動のデータが必要である。解決策として、バーチャルリアリティを用いた実験が考えられる。近年、標識や触覚デバイスを用いた誘導の効果検証や避難時の出口選択に関するデータ収集に応用されている [Cœugnet 18, Dubey 20, Lovreglio 16]。バーチャルリアリティの空間は Unity 3D で作成されることが多い [Catal 20, Lin 19, Lovreglio 16, Lovreglio 18]。今後は、シミュレータの開発、Unity 3D によるバーチャルリアリティ空間の表現、バーチャルリアリティ空間を用いた被験者実験の流れを作ることが、空間設計や群集制御の評価および群集移動のデータ収集の効率化につながると考える。

6. 結 論

群集が移動しやすい空間を設計することや、群集に介入して移動を制御することは、群集を安全かつ効率的に移動させるために必要であるが、現状でこれらの方法が十分に整理されているとは言えない。そこで本論文は、これまでの空間設計および群集制御に関する研究をまとめた。まず、群集移動の評価指標について安全と効率の観点から整理した。そして、空間設計について現在明らかになっている知見をまとめ、群集制御の方法に関しては歩行者の行動レベルで分類して説明した。また、これまでの研究の問題点を整理し、課題としてまとめ、その課題を解決するアプローチを紹介した。

現在、人工知能技術の発展により、人の意思決定のモデル化が進んでいる。さらに一人ひとりをエージェントとして表現し、複数の人が相互作用したときの現象を再現するマルチエージェントシミュレーションの技術も発展している。シミュレーションの対象は本論文で扱った群集だけでなく、交通や経済、感染症など多岐にわたり、

今後もシミュレーションの活用は増えていくと考える。本論文が群集移動に関わる研究者や、複雑な社会現象を対象とする研究者はもちろん人々が集まるイベントの主催者や施設の管理者の一助となれば幸いである。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [A&A] A&A : SimTread, <https://www.aanda.co.jp/products/simtread/>: Accessed: 2021-10-18
- [Abdelghany 14] Abdelghany, A., Abdelghany, K., Mahmassani, H., and Alhalabi, W.: Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities, *European Journal of Operational Research*, Vol. 237, No. 3, pp. 1105–1118 (2014)
- [Agrawal 08] Agrawal, A. W., Schlossberg, M., and Irvin, K.: How far, by which route and why? A spatial analysis of pedestrian preference, *Journal of Urban Design*, Vol. 13, No. 1, pp. 81–98 (2008)
- [Bentley] Bentley : LEGION, <https://www.bentley.com/en/products/brands/legion>: Accessed: 2021-10-18
- [Bernardini 17] Bernardini, G., Santarelli, S., Quagliarini, E., and D'Orazio, M.: Dynamic guidance tool for a safer earthquake pedestrian evacuation in urban systems, *Computers, environment and urban systems*, Vol. 65, pp. 150–161 (2017)
- [Catal 20] Catal, C., Akbulut, A., Tunali, B., Ulug, E., and Ozturk, E.: Evaluation of augmented reality technology for the design of an evacuation training game, *Virtual Reality*, Vol. 24, No. 3, pp. 359–368 (2020)
- [Chen 19] Chen, S., Fu, L., Fang, J., and Yang, P.: The effect of obstacle layouts on pedestrian flow in corridors: An experimental study, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 534, p. 122333 (2019)
- [Choi 19] Choi, M. and Chi, S.: Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 94, pp. 321–333 (2019)
- [Cœugnet 18] Cœugnet, S., Dommès, A., Panëels, S., Chevalier, A., Vienne, F., Dang, N.-T., and Anastassova, M.: Helping older pedestrians navigate unknown environments through vibrotactile guidance instructions, *Transportation Research. Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 58, pp. 816–830 (2018)
- [Cristiani 17] Cristiani, E. and Peri, D.: Handling obstacles in pedestrian simulations: Models and optimization, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 45, pp. 285–302 (2017)
- [Cristiani 19] Cristiani, E. and Peri, D.: Robust design optimization for egressing pedestrians in unknown environments, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 72, pp. 553–568 (2019)
- [Deb 02] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197 (2002)
- [Deere 21] Deere, S., Xie, H., Galea, E. R., Cooney, D., and Lawrence, P. J.: An evacuation model validation data-set for high-rise construction sites, *Fire Safety Journal*, Vol. 120, p. 103118 (2021)
- [Ding 11] Ding, A. W.: Implementing real-time grouping for fast egress in emergency, *Safety Science*, Vol. 49, No. 10, pp. 1404–1411 (2011)
- [Dong 14] Dong, H., Gao, X., Gao, T., Sun, X., and Wang, Q.: Crowd evacuation optimization by leader-follower model, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 47, No. 3, pp. 12116–12121 (2014)
- [Draghici 18] Draghici, A. and Van Steen, M.: A survey of techniques for automatically sensing the behavior of a crowd, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 51, No. 1, pp. 1–40 (2018)
- [Dubey 20] Dubey, R. K., Khoo, W. P., Morad, M. G., Hölscher, C., and Kapadia, M.: AUTOSIGN: A multi-criteria optimization approach to computer aided design of signage layouts in complex buildings, *Computers & Graphics*, Vol. 88, pp. 13–23 (2020)
- [Duives 13] Duives, D. C., Daamen, W., and Hoogendoorn, S. P.: State-of-the-art crowd motion simulation models, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 37, pp. 193–209 (2013)
- [Ezaki 12] Ezaki, T., Yanagisawa, D., and Nishinari, K.: Pedestrian flow through multiple bottlenecks, *Physical Review E*, Vol. 86, No. 2,

- p. 026118 (2012)
- [Fang 13] Fang, Z., Li, Q., Li, Q., Han, L. D., and Shaw, S.-L.: A space-time efficiency model for optimizing intra-intersection vehicle-pedestrian evacuation movements, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 31, pp. 112–130 (2013)
- [Feliciani 18] Feliciani, C., Murakami, H., and Nishinari, K.: A universal function for capacity of bidirectional pedestrian streams: Filling the gaps in the literature, *PLoS One*, Vol. 13, No. 12, p. e0208496 (2018)
- [Feng 14] Feng, L. and Miller-Hooks, E.: A network optimization-based approach for crowd management in large public gatherings, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 42, pp. 182–199 (2014)
- [Ferreira 16] Ferreira, I. A., Johansson, M., Sternudd, C., and Fornara, F.: Transport walking in urban neighbourhoods—Impact of perceived neighbourhood qualities and emotional relationship, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 150, pp. 60–69 (2016)
- [Fire Safety Engineering Group] Fire Safety Engineering Group : buildingEXODUS, https://fseg.gre.ac.uk/exodus/exodus_products.html: Accessed: 2021-10-19
- [Fruin 71] Fruin, J. J.: Designing for pedestrians: A level-of-service concept, *50th Annual Meeting of the Highway Research Board*, No. HS-011 999 (1971)
- [Garcimartín 14] Garcimartín, A., Zuriguel, I., Pastor, J., Martín-Gómez, C., and Parisi, D.: Experimental evidence of the “Faster Is Slower” effect, *Transportation Research Procedia*, Vol. 2, pp. 760–767 (2014)
- [Goerigk 14] Goerigk, M., Deghdak, K., and Heßler, P.: A comprehensive evacuation planning model and genetic solution algorithm, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 71, pp. 82–97 (2014)
- [Gravit 18] Gravit, M., Dmitriev, I., and Kuzenkov, K.: Phased evacuation algorithm for high-rise buildings, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 245, p. 11012 (2018)
- [Guo 13] Guo, Z. and Loo, B. P. Y.: Pedestrian environment and route choice: Evidence from New York City and Hong Kong, *Journal of Transport Geography*, Vol. 28, pp. 124–136 (2013)
- [Ha 12] Ha, V. and Lykotrafitis, G.: Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 391, No. 8, pp. 2740–2751 (2012)
- [Haghani 17] Haghani, M. and Sarvi, M.: Following the crowd or avoiding it? Empirical investigation of imitative behaviour in emergency escape of human crowds, *Animal Behaviour*, Vol. 124, pp. 47–56 (2017)
- [Haghani 18] Haghani, M. and Sarvi, M.: Crowd behaviour and motion: Empirical methods, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 107, pp. 253–294 (2018)
- [Haghani 19] Haghani, M., Sarvi, M., and Scanlon, L.: Simulating pre-evacuation times using hazard-based duration models: Is waiting strategy more efficient than instant response?, *Safety Science*, Vol. 117, pp. 339–351 (2019)
- [Haghani 20] Haghani, M.: Optimising crowd evacuations: Mathematical, architectural and behavioural approaches, *Safety Science*, Vol. 128, p. 104745 (2020)
- [萩原 95] 萩原一郎, 田中孝義: 避難安全規定の国際比較, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 60, No. 470, pp. 1–10 (1995)
- [Helbing 07] Helbing, D., Johansson, A., and Al-Abideen, H. Z.: Dynamics of crowd disasters: an empirical study, *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, Vol. 75, No. 4 Pt 2, p. 046109 (2007)
- [Hernandez-Mejia 20] Hernandez-Mejia, G. and Hernandez-Vargas, E. A.: When is SARS-CoV-2 in your shopping list?, *Mathematical Biosciences*, Vol. 328, p. 108434 (2020)
- [Hoogendoorn 04] Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P. H. L.: Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 38, No. 2, pp. 169–190 (2004)
- [Hu 18] Hu, N., Zhong, J., Zhou, J. T., Zhou, S., Cai, W., and Monterola, C.: Guide them through: An automatic crowd control framework using multi-objective genetic programming, *Applied Soft Computing*, Vol. 66, pp. 90–103 (2018)
- [Ikeda 17] Ikeda, S., Nozawa, T., Yokoyama, R., Miyazaki, A., Sasaki, Y., Sakaki, K., and Kawashima, R.: Steady beat sound facilitates both coordinated group walking and inter-subject neural synchrony, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 11, p. 147 (2017)
- [Ji-hua 13] Ji-hua, H. U., Cheng-zhi, Z., Zhi-feng, C., and Bo, W.: A research of pedestrian evacuation simulation for BRT station based on fine grid method, *Procedia Engineering*, Vol. 52, pp. 137–144 (2013)
- [Jiang 19a] Jiang, C., Ni, Z., Guo, Y., and He, H.: Learning human-robot interaction for Robot-assisted pedestrian flow optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 49, pp. 797–813 (2019)
- [Jiang 19b] Jiang, M., Jin, Q., and Cheng, L.: Effects of ticket-checking failure on dynamics of pedestrians at multi-exit inspection points with various layouts, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 5 (2019)
- [Karbovskii 19] Karbovskii, V., Severiukhina, O., Derevitskii, I., Voloshin, D., Presbitero, A., and Lees, M.: The impact of different obstacles on crowd dynamics, *Journal of Computational Science*, Vol. 36, p. 100893 (2019)
- [Kaveh 20] Kaveh, A., Javadi, S. M., and Moghanni, R. M.: Emergency management systems after disastrous earthquakes using optimization methods: A comprehensive review, *Advances in Engineering Software*, Vol. 149, p. 102885 (2020)
- [Khamis 20] Khamis, N., Selamat, H., Ismail, F. S., Lutfy, O. F., Haniff, M. F., and Nordin, I. N. A. M.: Optimized exit door locations for a safer emergency evacuation using crowd evacuation model and artificial bee colony optimization, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 131, p. 109505 (2020)
- [Khemlani] Khemlani L.: Designing for People, https://prod-bentleycdn.azureedge.net/-/media/files/documents/white-papers/wp_designing_for_people_ltr_en_lr.pdf?la=it-it&modified=00010101000000: Accessed: 2021-10-18
- [Koh 13] Koh, P. P. and Wong, Y. D.: Comparing pedestrians’ needs and behaviours in different land use environments, *Journal of Transport Geography*, Vol. 26, pp. 43–50 (2013)
- [Koo 13] Koo, J., Kim, Y. S., Kim, B.-I., and Christensen, K. M.: A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation, *Expert Systems With Applications*, Vol. 40, No. 2, pp. 408–417 (2013)
- [構造計画研究所] 構造計画研究所 MAS コミュニティ: artisoc, <https://mas.kke.co.jp/>: Accessed: 2021-10-19
- [Kuligowski 09] Kuligowski, E. D. and Mileti, D. S.: Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, No. 4, pp. 487–496 (2009)
- [Kurdi 18] Kurdi, H. A., Al-Megren, S., Althunyan, R., and Almulifi, A.: Effect of exit placement on evacuation plans, *European Journal of Operational Research*, Vol. 269, No. 2, pp. 749–759 (2018)
- [Li 15] Li, T., Chang, H., Wang, M., Ni, B., Hong, R., and Yan, S.: Crowded scene analysis: A survey, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 367–386 (2015)
- [Li 19a] Li, L., Liu, H., and Han, Y.: Arch formation-based congestion alleviation for crowd evacuation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 100, pp. 88–106 (2019)
- [Li 19b] Li, Y., Cai, W., and Kana, A. A.: Design of level of service on facilities for crowd evacuation using genetic algorithm optimization, *Safety Science*, Vol. 120, pp. 237–247 (2019)
- [Liao 14] Liao, W., Zheng, X., Cheng, L., Zhao, Y., Cheng, Y., and Wang, Y.: Layout effects of multi-exit ticket-inspectors on pedestrian evacuation, *Safety Science*, Vol. 70, pp. 1–8 (2014)
- [Liao 17] Liao, W., Kemloh Wagoum, A. U., and Bode, N. W. F.: Route choice in pedestrians: determinants for initial choices and revising decisions, *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, Vol. 14, No. 127, p. 20160684 (2017)
- [Lin 19] Lin, J., Cao, L., and Li, N.: Assessing the influence of repeated exposures and mental stress on human wayfinding perfor-

- mance in indoor environments using virtual reality technology, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 39, pp. 53–61 (2019)
- [Lopez-Carmona 21] Lopez-Carmona, M. A. and Paricio Garcia, A.: CellEVA: An adaptive guidance system for crowd evacuation through behavioral optimization, *Safety Science*, Vol. 139, p. 105215 (2021)
- [Lopez 18] Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., et al.: Microscopic traffic simulation using SUMO, in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE (2018)
- [Lovreglio 15] Lovreglio, R., Ronchi, E., and Nilsson, D.: A model of the decision-making process during pre-evacuation, *Fire Safety Journal*, Vol. 78, pp. 168–179 (2015)
- [Lovreglio 16] Lovreglio, R., Fonzone, A., and dell’Olio, L.: A mixed logit model for predicting exit choice during building evacuations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 92, pp. 59–75 (2016)
- [Lovreglio 18] Lovreglio, R., Gonzalez, V., Feng, Z., Amor, R., Spearpoint, M., Thomas, J., Trotter, M., and Sacks, R.: Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The auckland city hospital case study, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 38, pp. 670–682 (2018)
- [Lu 21] Lu, X., Blanton, H., Gifford, T., Tucker, A., and Olderman, N.: Optimized guidance for building fires considering occupants’ route choices, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 561, p. 125247 (2021)
- [Lujak 17] Lujak, M. and Ossowski, S.: Evacuation route optimization architecture considering human factor, *AI Communications. The European Journal on Artificial Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 1–14 (2017)
- [Lujak 18] Lujak, M. and Giordani, S.: Centrality measures for evacuation: Finding agile evacuation routes, *Future Generations Computer Systems: FGCS*, Vol. 83, pp. 401–412 (2018)
- [Macher 17] Macher, H., Landes, T., and Grussenmeyer, P.: From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings, *NATO Advanced Science Institutes Series E: Applied Sciences*, Vol. 7, No. 10, p. 1030 (2017)
- [松林 19] 松林 達史, 清武 寛, 幸島 匡宏, 戸田 浩之, 田中 悠介, 六藤 雄一, 塩原 寿子, 宮本 勝, 清水 仁, 大塚 琢馬, 岩田 具治, 澤田 宏, 納谷 太, 上田 修功: 人流における学習型誘導技術のデータ同化, 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 5, pp. wd-F-1–11 (2019)
- [Mayer 14] Mayer, H., Klein, W., Frey, C., Daum, S., Kiehl, P., and Borrmann, A.: Pedestrian simulation based on BIM data, *Proceedings of the ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference*, Atlanta, GA (2014)
- [Osaragi 04] Osaragi, T.: Modeling of pedestrian behavior and its applications to spatial evaluation, in *Proceedings of the third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Vol. 2, pp. 836–843 (2004)
- [PTV] PTV : Viswalk, <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-viswalk/>: Accessed: 2021-10-18
- [Qiao 17] Qiao, J., Sun, L., Liu, X., and Rong, J.: Reducing the impact of speed dispersion on subway corridor flow, *Applied ergonomics*, Vol. 65, pp. 362–368 (2017)
- [Réthoré 14] Réthoré, P.-E., Fuglsang, P., Larsen, G. C., Buhl, T., Larsen, T. J., and Madsen, H. A.: TOPFARM: Multi-fidelity optimization of wind farms, *Wind Energy*, Vol. 17, No. 12, pp. 1797–1816 (2014)
- [Rudenko 20] Rudenko, A., Palmieri, L., Herman, M., Kitani, K. M., Gavrilu, D. M., and Arras, K. O.: Human motion trajectory prediction: a survey, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 39, No. 8, pp. 895–935 (2020)
- [Salinas 17] Salinas, M. M., Wilken, J. M., and Dingwell, J. B.: How humans use visual optic flow to regulate stepping during walking, *Gait & Posture*, Vol. 57, pp. 15–20 (2017)
- [Sherman 11] Sherman, M. F., Peyrot, M., Magda, L. A., and Gershon, R. R. M.: Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis, *Fire Safety Journal*, Vol. 46, No. 7, pp. 414–424 (2011)
- [Shi 19] Shi, X., Ye, Z., Shiwakoti, N., Tang, D., and Lin, J.: Examining effect of architectural adjustment on pedestrian crowd flow at bottleneck, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 522, pp. 350–364 (2019)
- [Shigenaka 19] Shigenaka, S., Takami, S., Onishi, M., Yamashita, T., and Noda, I.: Estimating pedestrian flow in crowded situations with data assimilation, in *Proceedings of the 10th International Workshop on Optimization in Multi-Agent Systems Agents@AAMAS (OptMAS)* (2019)
- [Shimizu 20] Shimizu, H., Hara, T., and Iwata, T.: Deep reinforcement learning for pedestrian guidance, in *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pp. 334–342 (2020)
- [Sidiropoulos 20] Sidiropoulos, G., Kiourt, C., and Moussiades, L.: Crowd simulation for crisis management: The outcomes of the last decade, *Machine Learning with Applications*, Vol. 2, p. 100009 (2020)
- [Sóbestor 14] Sóbestor, A., Forrester, A. I., Toal, D. J., Tresidder, E., and Tucker, S.: Engineering design applications of surrogate-assisted optimization techniques, *Optimization and Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 243–265 (2014)
- [Soomaroo 12] Soomaroo, L. and Murray, V.: Disasters at mass gatherings: lessons from history, *PLoS Currents*, Vol. 4, p. RRN1301 (2012)
- [Srinivasan 17] Srinivasan, A. R., Karan, F. S. N., and Chakraborty, S.: Pedestrian dynamics with explicit sharing of exit choice during egress through a long corridor, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 468, pp. 770–782 (2017)
- [Still 14] Still, K.: *Introduction to Crowd Science*, CRC Press/Taylor & Francis Group (2014)
- [Styns 07] Styns, F., Noorden, van L., Moelants, D., and Leman, M.: Walking on music, *Human Movement Science*, Vol. 26, No. 5, pp. 769–785 (2007)
- [高木 02] 高木 任之: 建築基準法における性能規定化, 安全工学, Vol. 41, No. 5, pp. 296–301 (2002)
- [高島 20] 高島 凌: 京セラドーム大阪から創造する効果的な退場方法, 第 15 回 MAS コンペティション (2020)
- [Taneja 18] Taneja, L. and Bolia, N. B.: Network redesign for efficient crowd flow and evacuation, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 53, pp. 251–266 (2018)
- [東京大学社会連携部門 20] 東京大学社会連携部門 群集マネジメント研究会: 群集マネジメント総論, 東京大学出版会 (2020)
- [Vermuyten 16] Vermuyten, H., Beliën, J., De Boeck, L., Reniers, G., and Wauters, T.: A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems, *Safety Science*, Vol. 87, pp. 167–178 (2016)
- [Wang 19] Wang, J., Jin, B., Li, J., Chen, F., Wang, Z., and Sun, J.: Method for guiding crowd evacuation at exit: The buffer zone, *Safety Science*, Vol. 118, pp. 88–95 (2019)
- [Wijermans 16] Wijermans, N., Conrado, C., Steen, van M., Martella, C., and Li, J.: A landscape of crowd-management support: An integrative approach, *Safety science*, Vol. 86, pp. 142–164 (2016)
- [Wong 17a] Wong, S.-K., Wang, Y.-S., Tang, P.-K., and Tsai, T.-Y.: Optimized evacuation route based on crowd simulation, *Computational Visual Media*, Vol. 3, No. 3, pp. 243–261 (2017)
- [Wong 17b] Wong, S.-K., Wang, Y.-S., Tang, P.-K., and Tsai, T.-Y.: Optimized evacuation route based on crowd simulation, *Computational Visual Media*, Vol. 3, No. 3, pp. 243–261 (2017)
- [Yamada 20] Yamada, H. and Kamiyama, N.: An information distribution method for avoiding hunting phenomenon in theme parks, in *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 2050–2052 (2020)
- [山下 11] 山下 倫央, 副田 俊介, 大西 正輝, 依田 育士, 野田 五十樹: センサデータマイニングを活用した安全安心な避難誘導への取り組み, 電子情報通信学会誌, Vol. 94, No. 4, pp. 294–298 (2011)
- [山下 12] 山下 倫央, 副田 俊介, 大西 正輝, 依田 育士, 野田 五十樹: 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 7, pp. 1732–1744 (2012)
- [山下 20] 山下 裕, 重中 秀介, 大場 大輔, 大西 正輝: ニューラル

ネットワークを用いた大規模マルチエージェントシミュレーション結果の推定, 人工知能学会第二種研究会資料, Vol. 2020, No. SAI-039, p. 05 (2020)

[Yang 20a] Yang, S., Li, T., Gong, X., Peng, B., and Hu, J.: A review on crowd simulation and modeling, *Graphical Models*, Vol. 111, p. 101081 (2020)

[Yang 20b] Yang, W. and Lam, P. T. I.: An experimental contingent valuation of users' attitudes towards a crowd management system, *Safety Science*, Vol. 121, pp. 231–239 (2020)

[Yang 20c] Yang, X., Yang, X., Wang, Q., Kang, Y., and Pan, F.: Guide optimization in pedestrian emergency evacuation, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 365, p. 124711 (2020)

[Zeng 19] Zeng, G., Schadschneider, A., Zhang, J., Wei, S., Song, W., and Ba, R.: Experimental study on the effect of background music on pedestrian movement at high density, *Physics Letters. A*, Vol. 383, No. 10, pp. 1011–1018 (2019)

[Zhan 08] Zhan, B., Monekosso, D. N., Remagnino, P., Velastin, S. A., and Xu, L.-Q.: Crowd analysis: A survey, *Machine Vision and Applications*, Vol. 19, No. 5, pp. 345–357 (2008)

[Zhang 17] Zhang, Z., Jia, L., and Qin, Y.: Optimal number and location planning of evacuation signage in public space, *Safety Science*, Vol. 91, pp. 132–147 (2017)

[Zhang 21] Zhang, Z. and Jia, L.: Optimal guidance strategy for crowd evacuation with multiple exits: A hybrid multiscale modeling approach, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 90, pp. 488–504 (2021)

[Zhou 18] Zhou, M., Dong, H., Ning, B., and Wang, F.: Recent development in pedestrian and evacuation dynamics: Bibliographic analyses, collaboration patterns, and future directions, *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 1034–1048 (2018)

[Zou 20] Zou, B., Lu, C., and Li, Y.: Simulation of a hospital evacuation including wheelchairs based on modified cellular automata, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 99, p. 102018 (2020)

〔担当委員：諏訪 博彦〕

2021 年 11 月 5 日 受理

大西 正輝(正会員)

2002 年大阪府立大学大学院 工学研究科 博士後期課程修了。同年, 理化学研究所 BMC 研究センター 研究員。2006 年 産業技術総合研究所 情報技術研究部門 研究員。現在, 同研究所 人工知能研究センター 社会知能研究チーム長。博士 (工学)。

著者紹介

西田 遼(学生会員)

2020 年東北大学大学院情報科学研究科修士課程修了。現在, 同博士課程在学中。産業技術総合研究所リサーチアシスタント。

重中 秀介(学生会員)

2019 年筑波大学大学院システム情報工学研究科修士課程修了。現在, 同博士課程在学中。産業技術総合研究所リサーチアシスタント。

加藤 優作(学生会員)

2020 年芝浦工業大学工学部卒業。現在, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士前期課程在学中。産業技術総合研究所リサーチアシスタント。